



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Точение стали AISI 52100 с наложением ультразвуковых колебаний: сравнительная оценка и моделирование с использованием анализа размерностей

Говинд Гуле<sup>1, а, \*</sup>, Сударшан Санан<sup>1, b</sup>, Сатиш Чинчаникар<sup>2, c</sup>

<sup>1</sup> Университет искусств, дизайна и технологий Массачусетского технологического института, Пуне - 412201, Махараштра, Индия

<sup>2</sup> Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Пуне - 411039, Махараштра, Индия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4331-3501>, [govindghulemasterofengineering@gmail.com](mailto:govindghulemasterofengineering@gmail.com);

<sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3788-0692>, [sudarshan.sanap@mituniversity.edu.in](mailto:sudarshan.sanap@mituniversity.edu.in);

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>, [satish.chinchaniakar@viit.ac.in](mailto:satish.chinchaniakar@viit.ac.in)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.7

#### История статьи:

Поступила: 03 сентября 2023

Рецензирование: 17 сентября 2023

Принята к печати: 27 сентября 2023

Доступно онлайн: 15 декабря 2023

#### Ключевые слова:

Ультразвуковые колебания  
 Точение твердых материалов  
 Метод подобия  
 Теорема Бекингема  
 Износ режущего инструмента  
 Потребляемая электрическая  
 мощность

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Прецизионная обработка твердых и хрупких материалов является достаточно сложной, в связи с чем были разработаны новые и надежные технологии, например, точение с наложением ультразвуковых колебаний (UVAT), обеспечивающее повышенные скорость съема материала, качество поверхности и срок службы инструмента. **Цель работы.** Точение твердых материалов с использованием экономичного твердосплавного инструмента с покрытием вместо дорогостоящих керамических и КБН-пластин до сих пор не получило широкого распространения из-за износа инструмента и ограничений обработки. Для достижения лучшей обрабатываемости твердых материалов группа исследователей предприняла попытку токарной обработки, используя твердосплавный инструмент с различными покрытиями, различные методы охлаждения и др. Тем не менее исследователями было предпринято мало попыток по ультразвуковому точению твердых материалов (UVAHT). Более того, в открытой литературе редко сообщается о сравнительной оценке UVAHT с использованием анализа размерностей. **Методы исследования.** В данном исследовании проводится сравнительная оценка износа инструмента и потребляемой электрической мощности во время традиционного точения (СТ) и ультразвукового точения твердых материалов (UVAHT) из стали AISI 52100 (62 HRC) с использованием твердосплавного инструмента TiAlSiN с PVD-покрытием. Эксперименты проводились с различной скоростью резания, подачей и глубиной резания, при этом частота и амплитуда колебаний оставались постоянными на уровне 20 кГц и 20 мкм соответственно. Далее была разработана теоретическая модель для прогнозирования износа инструмента и потребляемой электрической мощности с использованием концепции анализа размерностей, т. е. л-теоремы Бекингема, учитывающей влияние скорости резания, частоты и амплитуды колебаний при постоянной подаче и глубине резания 0,085 мм/об и 0,4 мм соответственно. Безразмерные группы созданы для выявления сложных связей и оптимизации условий обработки. Износ инструмента и потребляемая электрическая мощность измерялись экспериментально и статистически анализировались с использованием л-теоремы Бекингема. **Результаты и обсуждение.** Благодаря использованию анализа размерностей удалось получить представление о процессе UVAHT. Результаты показывают, что параметры ультразвуковых колебаний оказывают существенное влияние на износ инструмента и потребляемую электрическую мощность. Безразмерные группы представляют собой методическую основу для уточнения режимов обработки. Износ инструмента и потребляемая электрическая мощность возрастали с увеличением скорости резания, глубины резания и подачи. Однако этот эффект был более значимым при традиционном точении, чем при ультразвуковом точении твердых материалов. Потребление энергии возрастало с увеличением скорости резания, частоты и амплитуды колебаний. Однако увеличение потребляемой электрической мощности было более заметным при изменении скорости резания, чем при изменении частоты и амплитуды колебаний. Износ по задней поверхности возрастает с увеличением скорости резания и амплитуды колебаний и уменьшается с увеличением частоты колебаний. Это исследование способствует лучшему пониманию основной динамики UVAHT, что поможет улучшить технологические процессы прецизионной обработки твердых материалов. В статье исследуется практическое значение этих открытий для прецизионной обработки твердых материалов.

**Для цитирования:** Гуле Г.С., Санан С., Чинчаникар С. Точение стали AISI 52100 с наложением ультразвуковых колебаний: сравнительная оценка и моделирование с использованием анализа размерностей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 136–150. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-136-150.

### Введение

Точение твердых материалов с наложением ультразвуковых колебаний (UVAHT) – это потенциальный метод обработки, который сочетает в себе преимущества традиционного точения

#### \*Адрес для переписки

Гуле Говинд С., магистр, доцент  
 Университет искусств, дизайна и технологий  
 Массачусетского технологического института,  
 Пуне - 412201, Махараштра, Индия  
 Тел.: +91-7020742258, e-mail: [govindghulemasterofengineering@gmail.com](mailto:govindghulemasterofengineering@gmail.com)



с использованием ультразвуковых колебаний для улучшения обрабатываемости твердых материалов. Широко используемая подшипниковая сталь AISI 52100 отличается высокой твердостью, износостойкостью и стабильностью размеров. Точение с наложением ультразвуковых колебаний (UVAT) продемонстрировало огромный потенциал для улучшения обрабатываемости таких твердых материалов, позволяя повысить скорость съема материала и целостность поверхности, а также снизить износ инструмента [1–3].

При использовании традиционного метода точения твердых материалов, к которым относится сталь AISI 52100, возникает ряд сложностей: увеличиваются силы резания, растет температура на границе между инструментом и заготовкой, инструмент быстрее изнашивается, что ухудшает шероховатость поверхности и точность размеров обрабатываемых деталей. Использование UVANT может решить эти проблемы за счет добавления высокочастотных ультразвуковых колебаний во время процесса токарной обработки.

Физика процесса UVANT предполагает распространение ультразвуковых колебаний через инструмент в заготовку, что приводит к микро-разрушению, снижению сил резания и улучшенному удалению стружки. Такое динамическое воздействие на процесс резания изменяет механизм удаления материала и влияет на взаимодействие инструмента и заготовки, что приводит к повышению производительности резания. Однако для того, чтобы в полной мере использовать преимущества UVANT при обработке стали AISI 52100, необходимо хорошо понимать влияние многочисленных технологических факторов и их взаимодействие.

В последние годы точение твердых материалов с наложением ультразвуковых колебаний (UVANT) привлекает большое внимание как потенциальная технология обработки твердых материалов, таких как сталь AISI 52100. В нескольких исследованиях изучалось влияние ультразвуковых колебаний на операции токарной обработки твердых материалов, а также потенциальное преимущество их использования для повышения целостности поверхности, снижения сил резания и продления срока службы инструмента. Анализ литературы дает обзор важных

исследований, связанных с UVANT и его использованием при обработке стали AISI 52100. В некоторых работах авторы сделали упор на ультразвуковое точение обычных материалов, подчеркивая снижение сил резания и высокое качество поверхности, обработанной с помощью этой технологии.

Лю (Liu) и др. [4] изучали влияние ультразвуковых колебаний на обрабатываемость резанием стали AISI 1045 и обнаружили, что это значительно увеличивает срок службы инструмента и качество поверхности. Их исследования заложили основу для дальнейшего изучения возможности использования UVANT для обработки твердых материалов, таких как сталь AISI 52100. Из-за широкого применения в промышленности точение твердой стали AISI 52100 вызвало интерес. Чтобы улучшить обрабатываемость этого материала, исследователи изучили различные параметры резания и геометрии инструмента. Авторы работы [5], например, исследовали влияние скорости резания и подачи на износ инструмента и шероховатость поверхности во время точения твердой стали AISI 52100. Эти исследования выявили трудности, связанные с традиционным твердым точением, и послужили стимулом для изучения других способов, таких как UVANT. Использование ультразвуковых колебаний при токарной обработке показало значительные перспективы с точки зрения повышения производительности обработки. Было изучено влияние различных ультразвуковых параметров, таких как амплитуда и частота колебаний, на силы резания и целостность поверхности во время UVANT.

В работе [6] исследовали влияние амплитуды ультразвуковых колебаний на образование стружки и шероховатость поверхности во время твердого точения стали AISI 4140, что дало важное представление о динамическом влиянии ультразвуковых колебаний на удаление материала. В области механической обработки анализ размерностей часто применяется для исследования корреляции между параметрами процесса и показателями производительности. Авторы в работе [7] использовали анализ размерностей для изучения влияния настроек резания на шероховатость поверхности при твердом точении, заложив основу для применения этого метода к UVANT. Аналогичным образом Чжан (Zhang)

и др. [8] использовали анализ размерностей для исследования влияния параметров процесса при ультразвуковом фрезеровании, подчеркивая возможности его применения для оптимизации процессов обработки.

Анализ размерностей – это надежный метод изучения процесса UVANT и определения важных характеристик, влияющих на его успех. Этот метод предполагает выявление и формулирование безразмерных групп, связывающих важные переменные процесса, без необходимости проведения экспериментального исследования. Размерный анализ дает важную информацию о взаимодействии между многочисленными технологическими факторами и их влиянии на производительность обработки резанием за счет сведения сложных взаимосвязей к безразмерным параметрам.

Авторы в работе [9] исследовали метод UVAT для обработки титанового сплава с использованием анализа размерностей для изучения влияния параметров ультразвуковых колебаний и обычных параметров течения на шероховатость поверхности и силы резания; были созданы безразмерные группы. Метод анализа размерностей оказался полезен для оптимизации параметров UVAT при обработке титановых сплавов. Ученые в работе [10] представили анализ размерностей, который использовался для исследования целостности поверхности во время UVAT. В ходе исследования было изучено, как параметры ультразвуковых колебаний и обычные параметры токарной обработки влияют на шероховатость поверхности, остаточное напряжение и микротвердость. Метод анализа размерностей помог определить важные параметры, влияющие на целостность поверхности, и позволил дать рекомендации по улучшению качества поверхности с помощью UVAT.

Ученые в работе [11] предложили анализ размерностей, используемый для исследования целостности поверхности при UVAT закаленной стали AISI 4340. Безразмерные группы были сформированы для исследования влияния ультразвуковых колебаний и параметров резания на шероховатость поверхности, твердость и остаточные напряжения. Исследование выявило рациональность использования UVAT для улучшения целостности поверхности, а также полезность анализа размерностей при изучении

процесса. Ученые в работе [12] провели эксперимент, который объяснил анализ размерностей ультразвукового микрорезания кремния. Безразмерные группы были созданы для исследования влияния параметров ультразвуковых колебаний и параметров резания на силы резания и качество поверхности. Метод анализа размерностей дал представление об оптимизации процесса микрорезания кремния.

**Целью** данной исследовательской работы является сравнительная оценка традиционного твердого точения и твердого точения с применением ультразвуковых колебаний, а также разработка теоретической модели износа инструмента и потребляемой электрической мощности с использованием метода анализа размерностей. Модель должна быть разработана с использованием  $\pi$ -теоремы Бекингема, рассматривающей в качестве входных параметров скорость резания, плотность и твердость заготовки, амплитуду и частоту колебаний. Результаты этого исследования помогут оптимизировать UVANT стали AISI 52100 и позволят сделать важные рекомендации по улучшению производительности механической обработки. Кроме того, результаты исследования станут полезным руководством для практиков отрасли, стремящихся повысить эффективность и качество операций твердого точения стали AISI 52100 с использованием ультразвуковых колебаний. UVANT может найти широкое применение в секторах точного производства, в которых используются твердые и труднообрабатываемые материалы, путем расширения понимания этого нового процесса обработки.

## Методика исследования

### *Конфигурация оборудования для UVANT*

Система ультразвуковых колебаний совмещена с обычным токарным станком в экспериментальной установке для токарной обработки с применением ультразвуковых колебаний (UVANT). Прецизионный токарный станок имеет моторизованный шпиндель и модифицированный держатель инструмента, специально предназначенный для установки ультразвукового инструмента (УЗИ), который представляет собой сборку из преобразователя, концентратора и утолщения, выступающего в качестве держа-

теля инструмента при реализации операций как традиционного твердого точения, так и с помощью ультразвуковых колебаний. Вращательное движение, необходимое для заготовки и режущего инструмента, обеспечивается токарным станком. Конструкция UVANT в целом состоит из нескольких компонентов: токарный станок, заготовка, специально разработанное приспособление, генератор ультразвуковых колебаний и узел преобразователя-усилителя (рис. 1).

В рамках этой устойчивой стратегии резки режущий инструмент и рабочая поверхность регулярно разделяются и соприкасаются (прерывистый процесс), что препятствует образованию нароста на режущей кромке резца (BUE). Эта продвинутая техника состоит из четырех основных этапов: 1) приближение; 2) прикосновение; 3) погружение; 4) отступление. Все четыре этапа UVAT воссозданы на рис. 2 для более полного понимания этого подхода [13–15].

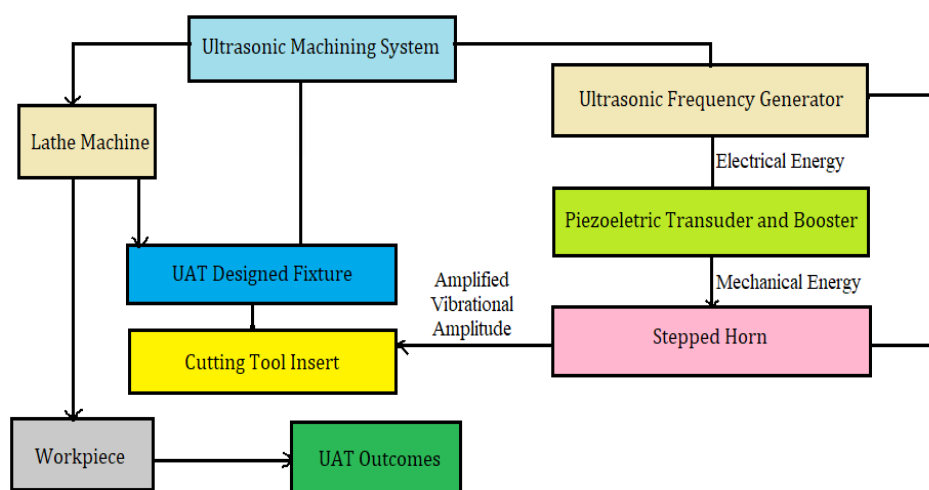


Рис. 1. Блок-схема системы UVANT

Fig. 1. Schematic diagram of UVANT systems

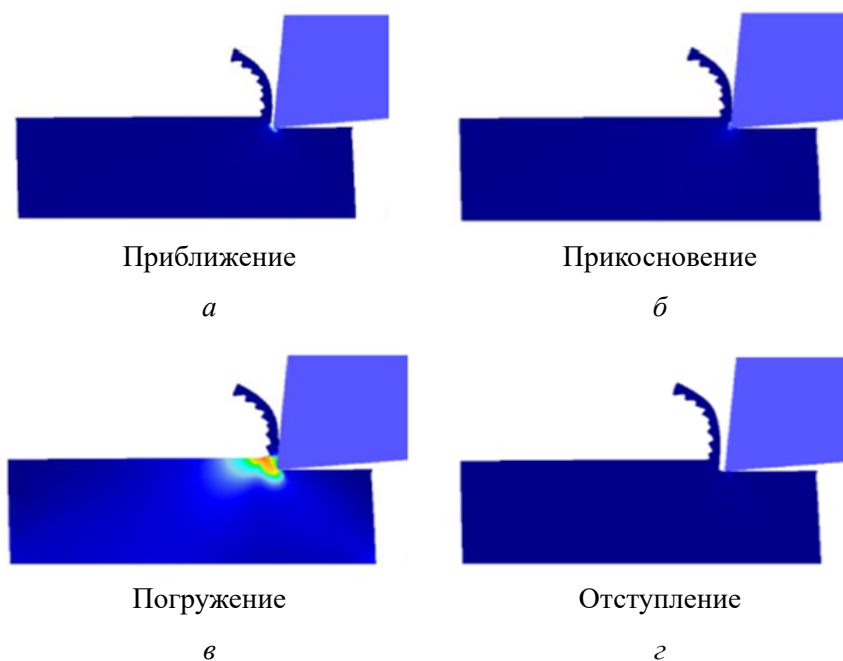


Рис. 2. Четыре этапа UVAT

Fig. 2. Four stages of UVAT

Однако когда колебания прилагаются в направлении скорости резания, необходимо учитывать несколько ограничений, а именно:  $V_c = \pi dn$ ;  $V_t = 2\pi AF$ , где  $V_c$  – скорость резания;  $n$  – число оборотов в минуту;  $d$  – диаметр заготовки;  $V_t$  – скорость вершины, т. е. колебательная скорость резания;  $A$  – амплитуда колебаний;  $F$  – частота. Если  $A = 20$  м и  $F = 20$  кГц, то значение  $V_t$ , т. е. скорость вершины, не должна увеличиваться более чем на 150 м/мин. Относительные перемещения режущего инструмента и заготовки при ультразвуковом точении (UVAT) изображены на рис. 3 [16].

Используя высокочастотные колебания, можно выполнить несколько циклов менее чем за миллисекунду. При традиционном точении (СТ) режущая кромка постоянно находится в контакте с поверхностью заготовки. При воздействии на режущую кромку ультразвуковых колебаний взаимодействие между кромкой инструмента и заготовкой полностью меняется и становится прерывистым [17].

### Экспериментальная установка

Материалом заготовки, использованной в экспериментах, была сталь AISI 52100 – распространенная подшипниковая сталь, известная своей высокой твердостью и износостойкостью. Из-за высокой твердости заготовок из упрочненной стали AISI 52100 необходима большая сила резания. Быстрый износ инструмента

и ломка стружки являются серьезными проблемами, поэтому материал режущего инструмента должен быть более устойчивым к истиранию. В результате выбор наиболее подходящего материала режущего инструмента, формы инструмента и условий резания имеет решающее значение для улучшения обрабатываемости упрочненной стали AISI 52100. В этом эксперименте использовался инструмент TiAlSiN с PVD-покрытием и геометрией CNMG120408-MF5. Фотография базовой рамы с закрепленным UVANT представлена на рис. 4. Кроме того, в табл. 1 показана геометрия режущей пластины.

Эксперименты с применением ультразвукового точения проводили на токарном станке с максимальной частотой вращения шпинделя 1145 об/мин при мощности двигателя 2,2 кВт. В ходе пробных исследований были определены скорость резания, подача, глубина резания, частота и амплитуда колебаний. Эксперименты планировали с использованием метода исследования поверхности отклика, а именно ротатбельного центрального композиционного планирования (CCRD). В табл. 2 показан выбор режимов резания для токарной обработки.

Подход CCRD позволяет выбрать набор экспериментальных запусков, который полностью покрывает проектное пространство, требуя при этом наименьшего количества доступных испытаний, что помогает оптимизировать экспериментальные настройки. На основе пробных

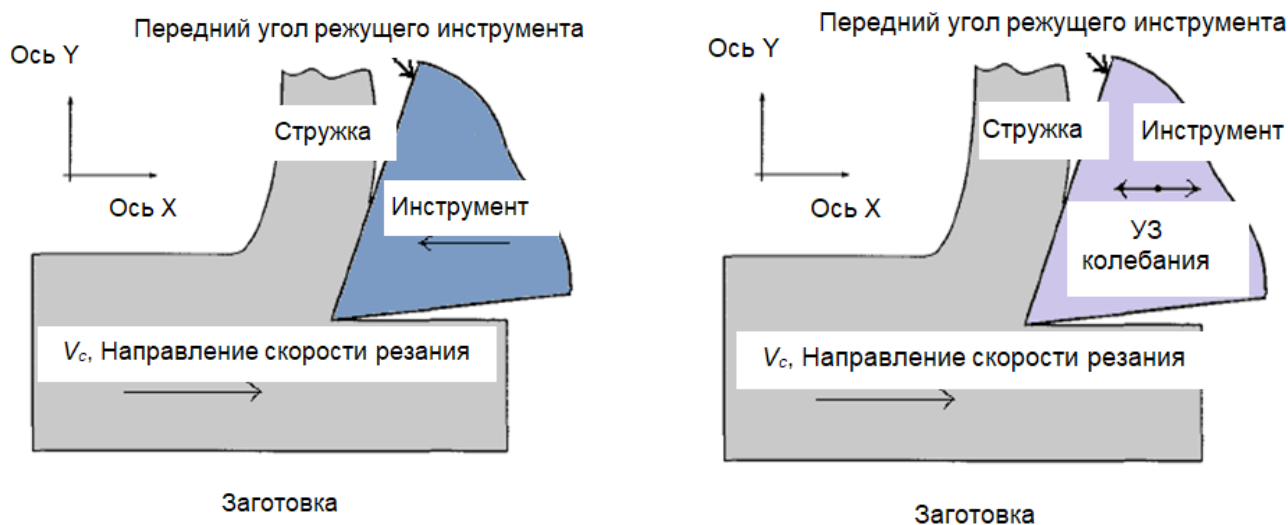


Рис. 3. Относительные перемещения режущего инструмента и заготовки при традиционном и ультразвуковом точении

Fig. 3. Relative displacements of the cutting tool and the workpiece in CT and UVAT



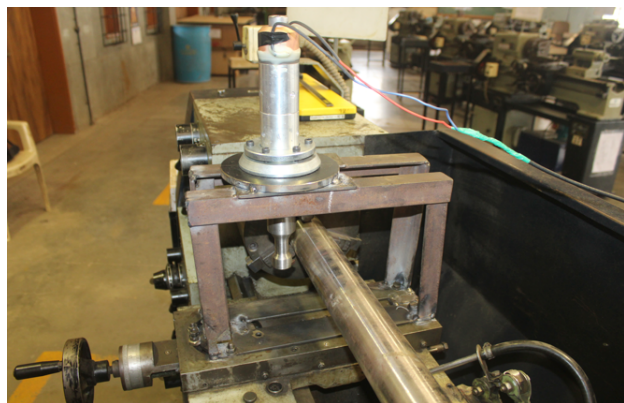


Рис. 4. Реальная фотография базовой рамы с закрепленным UVANT

Fig. 4. Actual photograph of base frame with UVANT mounting

Таблица 1

Table 1

**Геометрия режущей пластины**  
**Geometry of the cutting insert**

Параметр	Значение
Угол профиля, град	80
Длина режущей кромки, мм	12,9
Диаметр вписанной окружности, мм	12,7
Толщина пластины, мм	4,76
Вес пластины, кг	0,01
Угол в плане, град	75
Радиус закругления вершины, мм	0,8

Таблица 2

Table 2

**Значения параметров резания, полученные с помощью Design Expert**  
**Values of cutting parameters obtained by Design Expert**

Номер эксперимента	Сравнительная оценка СТ и UVANT			Теоретическое моделирование: UVANT		
	Скорость резания $V_c$ , м/мин	Подача $f$ , мм/об	Глубина резания $d$ , мм	Скорость резания $V_c$ , м/мин	Частота $F$ , кГц	Амплитуда $A$ , мкм
1	60	0,085	0,4	60	20	20
2	120	0,075	0,35	120	20	20
3	100	0,068	0,4	100	20	20
4	100	0,085	0,5	100	20	20
5	100	0,085	0,4	100	20	20
6	80	0,075	0,35	80	20	20
7	100	0,085	0,3	100	20	20
8	120	0,075	0,45	120	20	20
9	100	0,103	0,4	100	20	20
10	100	0,085	0,4	100	20	20
11	80	0,095	0,45	80	20	20
12	100	0,085	0,4	100	20	20
13	100	0,085	0,4	100	20	20
14	80	0,075	0,45	80	20	20
15	100	0,085	0,4	100	20	20
16	120	0,095	0,35	120	20	20
17	80	0,095	0,35	80	20	20
18	120	0,095	0,45	120	20	20
19	145	0,085	0,4	145	20	20
20	100	0,085	0,4	100	20	20

экспериментов были выбраны скорость резания, подача, глубина резания, частота и амплитуда колебаний.

Были проведены две серии экспериментов. В первой серии сравнивали характеристики традиционного точения (СТ) и твердого точения с наложением ультразвуковых колебаний (UVAHT) в зависимости от скорости резания, подачи и глубины резания. В первой серии экспериментов UVAHT проводили с использованием постоянной частоты 20 кГц и амплитуды колебаний 20 мкм. Для лучшего понимания UVAHT с использованием анализа размерностей разработана теоретическая модель потребляемой электрической мощности и износа по задней поверхности. Вторую серию экспериментов проводили для калибровки разработанной модели с учетом влияния скорости резания, частоты и амплитуды колебаний. Режимы резания, использованные для сравнительной оценки и теоретического моделирования, представлены в табл. 2.

Основное внимание в настоящем исследовании уделено износу инструмента и потребляемой электрической мощности. Для измерения износа инструмента использовали цифровой микроскоп Dino-Lite с увеличением до  $\times 240$ . Для измерения тока, протекающего по проводу под напряжением, использовали клещи, похожие на прищипки. С помощью токовых клещей обнаруживали магнитное поле, создаваемое текущим током в проводе. Потребляемая мощность во время точения определялась произведением напряжения и измеренного тока. Фактический набор условий обработки в соответствии с планом эксперимента показан в табл. 2. В случае обычного вращения частота и амплитуда считаются нулевыми, а в случае ультразвукового точения частота и амплитуда поддерживались постоянными на уровне 20 кГц и 20 мкм соответственно.

## Результаты и их обсуждение

### *Относительная производительность: СТ и UVAHT*

Первую серию из двадцати экспериментов, как показано в табл. 2, проводили для сравнительной оценки потребляемой электрической мощности и износа по задней поверхности при СТ и UVAHT. Эксперименты проводили с изменением скорости резания, подачи и глубины ре-

зания, а эксперименты UVAHT проводили с использованием постоянной частоты и амплитуды колебаний 20 кГц и 20 мкм соответственно.

Износ инструмента – это постоянное разрушение материала инструмента, которое приводит к отклонению инструмента от его первоначальной формы во время резки. Износ инструмента влияет на эффективность обработки, качество, режущую способность и цену. Кроме того, износ инструмента также оказывает значительное влияние на качество поверхности обрабатываемой детали. Обычно считается, что тремя основными формами износа являются истирание, адгезия и диффузия. Для контроля износа инструмента использовали цифровой микроскоп Dino-Lite с увеличением до  $\times 250$ . Dino Capture 2.0 распознавал изображения и сохранял их в системной памяти при установке на ноутбук. Ниже представлены изображения износа инструмента, полученные с помощью цифрового микроскопа, с различной степенью детализации. Как было определено ранее, частоту и амплитуду при традиционном точении считали нулевыми, а в случае ультразвукового точения частоту и амплитуду поддерживали постоянными на уровне 20 кГц и 20 мкм соответственно.

Мощность тока во время резки обеспечивает стабильность и помогает выбрать соответствующие настройки для снижения потребляемой электрической мощности. Чтобы способствовать устойчивому развитию процесса обработки, потребление энергии должно быть снижено на протяжении всего процесса обработки. В этом разделе описывается, как станки используют энергию при СТ и UVAHT в различных условиях резания. Мощность тока, необходимая для работы токарного станка, рассчитывается как произведение напряжения и тока. На протяжении всего эксперимента напряжение поддерживалось постоянным на уровне примерно 420 В (трехфазное), а ток контролировался с помощью токоизмерительных клещей. Экспериментально обоснованное изменение износа инструмента и потребляемой электрической мощности при СТ и UVAHT показано на рис. 5 и 6.

### *Анализ размерностей*

Вторую серию из двадцати экспериментов, как показано в табл. 2, проводили для калибровки теоретически разработанных моделей износа

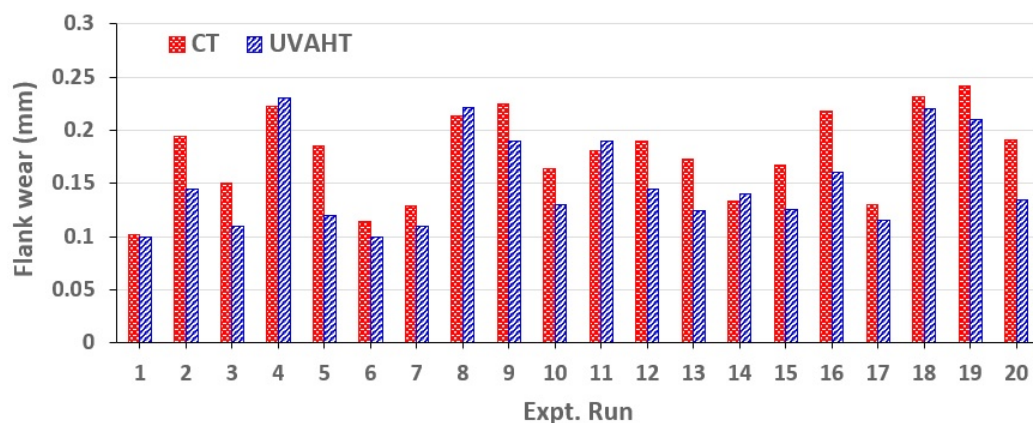


Рис. 5. Сравнение износа по задней поверхности при CT и UVANT

Fig. 5. Comparison of flank wear in CT and UVANT

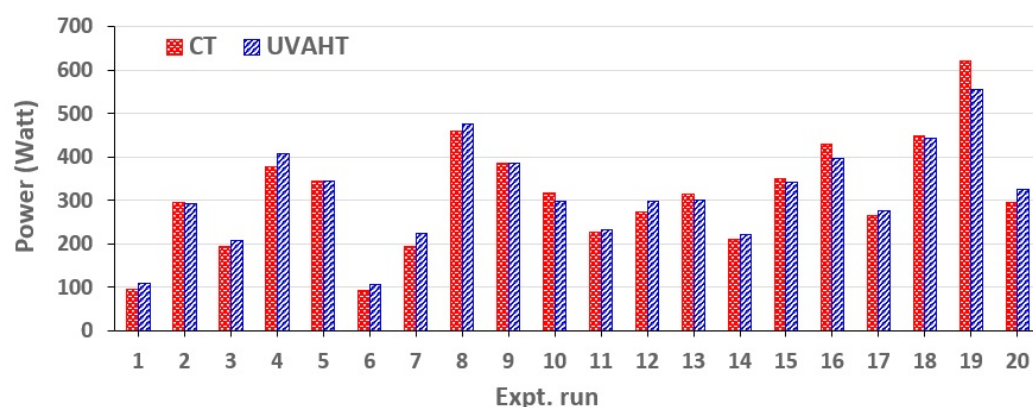


Рис. 6. Сравнение потребляемой электрической мощности при CT и UVANT

Fig. 6. Comparison of power consumption in CT and UVANT

по задней поверхности и потребляемой мощности для UVANT. Эксперименты проводили с варьированием скорости резания, частоты и амплитуды колебаний, как показано в табл. 2, при постоянной подаче и глубине резания 0,085 мм/об и 0,4 мм соответственно.

*П-теорема Бекингема*, названная в честь физика Эдгара Бекингема, является фундаментальным принципом анализа размерностей: когда физическая проблема включает в себя  $n$  переменных и  $m$  фундаментальных измерений (длина, время, масса и др.), проблема может быть выражена с использованием  $(n - m)$  безразмерных параметров ( $\pi$ -параметров).  $\pi$ -параметры строятся как произведения исходных переменных, возведенных в соответствующие степени, а результирующее выражение является безразмерным [18–20]. Процесс определения  $\pi$ -параметров включает в себя поиск размерно независимых групп переменных, которые описывают физические явления в задаче. Согласно  $\pi$ -теореме Бекингема уравнение, связывающее

все переменные, будет иметь  $(n - m)$  безразмерных групп, если в задаче есть  $n$  переменных и эти переменные содержат  $m$  фундаментальных измерений (например,  $M$ ,  $L$  и  $T$ ):

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}).$$

Полученное уравнение принимает следующий вид: группы не должны зависеть друг от друга и ни одна группа не должна создаваться путем сложения других групп. Преимущество этого подхода состоит в том, что его проще использовать, чем метод взаимного распределения для определения значений индексов (экспонентных значений переменных). Есть две предпосылки для использования этого подхода при решении уравнения. Каждое из фундаментальных измерений должно быть представлено как минимум одной из переменных  $m$ . Одна из переменных рекуррентного множества не должна иметь возможности образовать безразмерную группу. Безразмерная группа переменных известна как повторяющийся набор.



# Выбор безразмерных параметров

Таблица 3

Table 3

## Анализ размерностей

### Dimensional analysis

Параметр	Представление
Потребляемая мощность $P_c$ , Вт	$M^1 L^2 T^{-3}$
Скорость съема материала $MRR$ , мм <sup>3</sup> /с	$M^0 L^3 T^{-1}$
Плотность материала $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$M^1 L^{-3} T^0$
Амплитуда колебаний $A$ , мкм	$M^0 L^1 T^0$
Частота колебаний $F$ , кГц	$M^0 L^0 T^{-1}$

Выбор безразмерных параметров ( $\pi$ -параметров) предполагает выделение размерно независимых групп переменных. Эти группы выбираются на основе физики, лежащей в основе проблемы. Цель состоит в том, чтобы уловить важные взаимодействия и отношения между переменными, которые управляют поведением системы. В контексте традиционного, а также ультразвукового точения (UVANT) стали AISI 52100 решающую роль, влияющую на производительность обработки, играют несколько переменных процесса. Этот процесс включает в себя идентификацию фундаментальных величин (длина  $[L]$ , время  $[T]$ , масса  $[M]$  и др.) и определение количества безразмерных параметров ( $\pi$ -параметров), необходимых для описания поведения системы. Исследуя соответствующие переменные процессы и соответствующие им единицы, можно установить взаимосвязи между переменными и сформировать безразмерные группы.

## Моделирование потребления мощности ( $P_c$ )

После проведения анализа размерностей формулируются безразмерные группы, представляющие взаимосвязи между соответствующими переменными процесса. Эти безразмерные группы дают ценную информацию о взаимодействии параметров традиционного и ультразвукового точения. Потребляемая мощность зависит от четырех параметров, а именно скорости съема материала ( $MRR$ ), плотности материала ( $\rho$ ), амплитуды вибрации ( $A$ ) и частоты вибрации ( $F$ ). Теперь, выбрав  $M$  (массу),  $L$  (длину) и  $T$  (время) в качестве основных размеров, размеры вышеупомянутых величин будут следующими (табл. 3).

При этом  $P_c = \varphi(MRR, \rho, A, F)$ .

Здесь  $n = 5$ , а  $m = 3$ , следовательно, с учетом того же самого ( $n - m = 2$ ),  $\pi_1$  и  $\pi_2$  – две безразмерные группы, которые будут получены. Теперь, принимая  $MRR$ ,  $\rho$  и  $A$  как величины, которые непосредственно входят в  $\pi_1$  и  $\pi_2$  соответственно, получаем

$$\pi_1 = [MRR]^{a_1} \times [\rho]^{b_1} \times [A]^{c_1} \times P_c.$$

Таким образом,

$$M^0 L^0 T^0 = [M^0 L^3 T^{-1}]^{a_1} \times [M^1 L^{-3} T^0]^{b_1} \times [M^0 L^1 T^0]^{c_1} \times [M^1 L^2 T^{-3}];$$

$$M^0 L^0 T^0 = [L^3 T^{-1}]^{a_1} \times [M^1 L^{-3}]^{b_1} \times [L^1]^{c_1} \times [M^1 L^2 T^{-3}];$$

$$M^0 L^0 T^0 = M^{(1+b_1)} L^{(3a_1-3b_1+c_1+2)} T^{(-a_1-3)}.$$

По равенству можно найти, что  $a_1 = -3$ ,  $b_1 = -1$  и  $c_1 = 4$ . Отсюда получаем

$$\pi_1 = [MRR]^{-3} \times [\rho]^{-1} \times [A]^4 \times P_c.$$

Подобным образом

$$\pi_2 = [MRR]^{a_2} \times [\rho]^{b_2} \times [A]^{c_2} \times F;$$

$$M^0 L^0 T^0 = [M^0 L^3 T^{-1}]^{a_2} \times [M^1 L^{-3} T^0]^{b_2} \times [M^0 L^1 T^0]^{c_2} \times [M^0 L^0 T^{-1}];$$

$$M^0 L^0 T^0 = [L^3 T^{-1}]^{a_2} \times [M^1 L^{-3}]^{b_2} \times [L^1]^{c_2} \times [M^0 L^0 T^{-1}];$$

$$M^0 L^0 T^0 = M^{b_2} L^{(3a_2-3b_2+c_2)} T^{(-a_2-1)}.$$

По равенству можно найти, что  $a_2 = -1$ ,  $b_2 = 0$  и  $c_2 = 3$ . Отсюда получаем

$$\pi_2 = [MRR]^{-1} \times [\rho]^0 \times [A]^3 \times F.$$

Теперь это можно записать так:

$$\pi_1 = k [\pi_2]^n,$$

где  $k$  и  $n$  – константы;

$$\begin{aligned} [MRR]^{-3} \times [\rho]^{-1} \times [A]^4 \times P_c &= \\ &= k \{ [MRR]^{-1} \times [A]^3 \times F \}^n. \end{aligned}$$

Скорость съема материала ( $MRR$ ) является произведением скорости резания  $V$ , подачи  $f$  и глубины резания  $d$ . Упрощая этот термин, потребляемую мощность можно представить как

$$P_c = (k\rho fd)V^{(3-n)}F^nA^{(3n-4)}.$$

Эксперименты проводили при постоянной подаче и глубине резания. Плотность  $\rho$  материала также постоянна. Поэтому определим  $k_1$  как новую константу, которая является произведением  $k$ ,  $\rho$ ,  $f$  и  $d$ . Таким образом, окончательная модель для прогнозирования потребляемой электрической мощности при UVAHT показана ниже:

$$P_c = k_1V^{(3-n)}F^nA^{(3n-4)}.$$

Константу  $n$  можно получить путем калибровки модели с использованием экспериментальных значений потребляемой электрической мощности при UVAHT, полученных при различных условиях резания, как показано в табл. 2.

Имеем

$$P_c = 0,00222V^{1,5987}F^{1,4013}A^{0,2039}. \quad (1)$$

### Моделирование износа инструмента ( $V_b$ )

Износ инструмента определяется четырьмя параметрами: скоростью резания  $V$ , твердостью материала  $H$ , амплитудой колебаний  $A$  и частотой колебаний  $F$ . Используя  $M$  (массу),  $L$  (длину) и  $T$  (время) в качестве основных размеров, размеры предыдущих значений будут следующими: учитывая, что  $V_b = \phi(V, H, A, F)$ , при  $n = 5$ , а  $m = 3$  и, следовательно,  $n - m = 2$ . Таким образом,  $\pi_1$  и  $\pi_2$  – две безразмерные группы, которые будут определены. Теперь, взяв  $V$ ,  $H$  и  $A$  в качестве величин, непосредственно входящих в  $\pi_1$  и  $\pi_2$  соответственно, получим

$$\pi_1 = [V]^{a_1} \times [H]^{b_1} \times [A]^{c_1} \times V_b.$$

Следовательно,

$$M^0L^0T^0 = [M^0L^1T^{-1}]^{a_1} \times [M^1L^{-1}T^{-2}]^{b_1} \times [M^0L^1T^0]^{c_1} \times [M^0L^1T^0];$$

$$M^0L^0T^0 = [L^1T^{-1}]^{a_1} \times [M^1L^{-1}T^{-2}]^{b_1} \times [L^1]^{c_1} \times [L^1];$$

$$M^0L^0T^0 = M^{(b_1)}L^{(a_1-b_1+c_1+1)}T^{(-a_1-2b_1)}.$$

По равенству можно найти, что  $a_1 = 0$ ,  $b_1 = 0$  и  $c_1 = -1$ . Следовательно, получаем

$$\pi_1 = [V]^0 \times [H]^0 \times [A]^{-1} \times V_b.$$

Подобным образом

$$\pi_2 = [V]^{a_2} \times [H]^{b_2} \times [A]^{c_2} \times F;$$

$$M^0L^0T^0 = [M^0L^1]^{a_2} \times [M^1L^1T^2]^{b_2} \times [M^0L^1T^0] \times [M^0L^0T^1];$$

$$M^0L^0T^0 = [L^1T^{-1}]^{a_2} \times [M^1L^{-1}T^1]^{b_2} \times [L^1] \times [T^1];$$

$$M^0L^0T^0 = M^{(b_2)}L^{(a_2-b_2+c_2)}T^{(-a_2-2b_2-1)}$$

По равенству можно найти, что  $a_2 = -1$ ,  $b_2 = 0$  и  $c_2 = 1$ . Отсюда получаем

$$\pi_2 = [V]^{-1} \times [H]^0 \times [A]^1 \times F.$$

Теперь это можно записать так:

$$\pi_1 = k[\pi_2]^n;$$

$$[A]^{-1} \times V_b = k \{ [V]^{-1} \times [A]^1 \times F \}^n.$$

Упростив это выражение, его можно представить как

$$V_b = kV^{-n}A^{(1+n)}F^n;$$

$$V_b = 0,011336V^{0,1967}A^{0,8033}F^{-0,1967}. \quad (2)$$

Потребляемая мощность и износ по задней поверхности построены с использованием разработанных теоретических моделей (уравнения (1) и (2)) при изменении скорости резания, частоты и амплитуды вибрации. На рис. 7, а показана зависимость потребляемой мощности и износа по задней поверхности от скорости резания (частота и амплитуда колебаний постоянны и равны 20 кГц и 20 мкм соответственно).

На рис. 7, б показана зависимость потребляемой электрической мощности и износа по задней поверхности от частоты колебаний при постоянной скорости резания и амплитуде колебаний 100 м/мин и 20 мкм соответственно. На рис. 7, в показана зависимость потребляемой электрической мощности и износа по задней поверхности от амплитуды колебаний при постоянной скорости резания и частоте колебаний 100 м/мин и 20 кГц соответственно. Потребляемая мощность увеличивается с увеличением скорости резания,

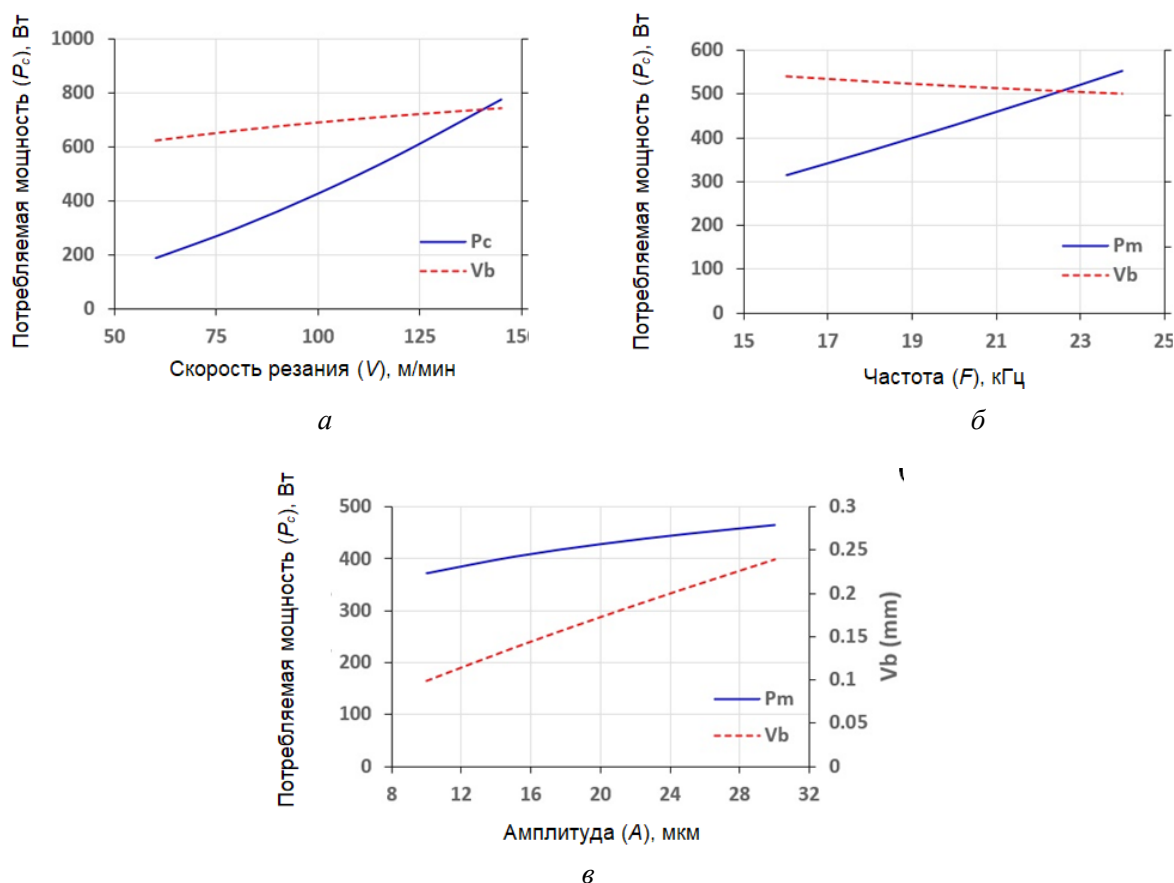


Рис. 7. Зависимость потребляемой мощности и износа по задней поверхности от скорости резания (а), частоты колебаний (б), амплитуды колебаний (в)

Fig. 7. Power consumption and flank wear varying with cutting speed (a), frequency of vibration (б), amplitude of vibration (в)

частоты и амплитуды колебаний. Тем не менее потребляемая электрическая мощность зависит в первую очередь от скорости резания, а затем уже от частоты и амплитуды колебаний. Это также может быть подтверждено более высокими значениями показателя степени, наблюдаемыми для скорости резания, за которой следуют частота вибрации и амплитуда. Износ по задней поверхности увеличивается с возрастанием скорости резания и амплитуды колебаний и уменьшается с увеличением частоты колебаний.

### Закключение

В этом исследовании проведена сравнительная оценка износа инструмента и потребляемой электрической мощности во время традиционного точения (СТ) и твердого точения с наложением ультразвуковых колебаний (UVAHT) стали AISI 52100 (62 HRC) с использованием твердосплавного инструмента TiAlSiN с PVD-

покрытием. Теоретическая модель для прогнозирования износа инструмента и потребляемой электрической мощности разработана с использованием концепции анализа размерностей, т. е.  $\pi$ -теоремы Бекингема, учитывающей влияние скорости резания, частоты и амплитуды колебаний. Безразмерные группы созданы для выявления сложных связей и оптимизации условий обработки. Износ инструмента и энергопотребление измерены экспериментально и статистически проанализированы с использованием  $\pi$ -теоремы Бекингема. Из настоящего исследования можно сделать следующие выводы.

1. На износ инструмента существенное влияние оказывает скорость резания. Однако этот эффект более заметен при традиционном точении (СТ), что можно объяснить увеличением температуры резания в процессе обработки. Этот эффект менее выражен при UVAHT из-за периодического контакта инструмента с заготовкой, что позволяет инструменту охлаждаться естественным путем и, следовательно, снижает его износ.



2. При UVАНТ потребление мощности чуть больше, чем при СТ. При UVАНТ требуется дополнительная мощность для привода ультразвукового генератора, в которой не было необходимости при СТ.

3. Износ инструмента и потребляемая электрическая мощность увеличивались с увеличением скорости резания, глубины резания и подачи. Однако этот эффект был более очевидным при СТ, чем при UVАНТ.

4. Потребление энергии возрастало с увеличением скорости резания, частоты и амплитуды колебаний. Однако увеличение потребляемой электрической мощности было более заметным при изменении скорости резания, чем при изменении частоты и амплитуды колебаний.

5. Износ по задней поверхности увеличивается с возрастанием скорости резания и амплитуды колебаний и уменьшается с увеличением частоты колебаний.

### Список литературы

1. Ultrasonically assisted turning of aviation materials / V.I. Babitsky, A.N. Kalashnikov, A. Meadows, A.A.H.P. Wijesundara // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – Vol. 132. – P. 157–167. – DOI: 10.1016/s0924-0136(02)00844-0.
2. Babitsky V.I., Mitrofanov A.V., Silberschmidt V.V. Ultrasonically assisted turning of aviation materials: simulations and experimental study // *Ultrasonics*. – 2004. – Vol. 42. – P. 81–86. – DOI: 10.1016/j.ultras.2004.02.001.
3. Vivekananda K., Arka G.N., Sahoo S.K. Design and analysis of ultrasonic vibratory tool (UVT) using FEM, and experimental study on ultrasonic vibration-assisted turning (UAT) // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 97. – P. 1178–1186. – DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.396.
4. Liu Y., Li J., Zhang L. Effects of ultrasonic vibration on cutting forces and machined surface quality in turning of AISI 1045 steel // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 101. – P. 1137–1147. – DOI: 10.1038/s41598-022-21236-x.
5. Analysis of forces in vibro-impact and hot vibro-impact turning of advanced alloys / R. Muhammad, A. Maurotto, A. Roy, V.V. Silberschmidt // *Applied Mechanics and Materials*. – 2011. – Vol. 70. – P. 315–320. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.70.315.
6. Lotfi M., Amini S., Akbari J. Surface integrity and microstructure changes in 3D elliptical ultrasonic assisted turning of Ti–6Al–4V: FEM and experimental examination // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 151. – P. 106492. – DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106492.
7. Ultrasonic Assisted Turning of mild steels / A. Celaya, N.N.L. Luis, J.C. Francisco, A. Lamikiz // *International Journal of Materials and Product Technology*. – 2010. – Vol. 37. – DOI: 10.1504/IJMPT.2010.029459.
8. Experimental study on the surface micro-geometrical characteristics of quenched steel in ultrasonic assisted turning / F. Jiao, X. Liu, C. Zhao, X. Zhang // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 189–193. – P. 4059–4063. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.4059.
9. Comparing machinability of Ti-15-3-3-3 and Ni-625 alloys in UAT / A. Maurotto, R. Muhammad, A. Roy, V.I. Babitsky, V.V. Silberschmidt // *Procedia CIRP*. – 2012. – Vol. 1. – P. 330–335. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.059.
10. Experimental investigation of ultrasonic vibration assisted turning of 304 austenitic stainless steel / P. Zou, Y. Xu, Y. He, M. Chen, H. Wu // *Shock and Vibration*. – 2015. – Art. 817598. – DOI: 10.1155/2015/817598.
11. Kumar J., Khamba J.S. Modelling the material removal rate in ultrasonic machining of titanium using dimensional analysis // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2010. – Vol. 48. – P. 103–119. – DOI: 10.1007/s00170-009-2287-1.
12. Kugaevskii S.S., Ashikhmin V.N. Using local coordinate systems for dimensional analysis in the machining // *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018*. – Springer, 2018. – P. 301–309. – DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5\_33.
13. Skelton R.C. Turning with an oscillating tool // *International Journal of Machine Tool Design and Research*. – 1968. – Vol. 8. – P. 239–259. – DOI: 10.1016/0020-7357(68)90014-0.
14. Mitrofanov A.V., Babitsky V.I., Silberschmidt V.V. Thermomechanical finite element simulations of ultrasonically assisted turning // *Computational Materials Science*. – 2005. – Vol. 32. – P. 463–471. – DOI: 10.1016/j.commatsci.2004.09.019.
15. Ghule G.S., Sanap S. Ultrasonic vibrations assisted turning (UAT): A review // *Advances in Engineering Design: Select proceedings of FLAME 2020*. – Springer, 2021. – P. 275–285. – DOI: 10.1007/978-981-33-4684-0\_28.
16. Nath C., Rahman M., Andrew S.S.K. A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – P. 159–165. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.047.
17. Experimental investigations on the ultrasonic vibration-assisted hard turning of AISI 52100 steel using coated carbide tool / G.S. Ghule, S. Sanap, S. Adsul, S. Chinchani, M. Gadge // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 68 (6). – P. 2093–2098. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.368.



18. Prediction of erosion volume of PDMS by cryogenic micro-abrasive jet machining based on dimensional analysis method and experimental verification / G. Zhang, Y. Sun, L. Xu, L. Wang, D. Zuo // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 114. – P. 2447–2455. – DOI: 10.1007/s00170-021-07020-7.

19. Singh N.K., Sign Y. Experimental investigation and modelling of surface finish in argon-assisted electrical discharge machining using dimensional analysis //

Arabian Journal for Science and Engineering. – 2019. – Vol. 44. – P. 5839–5850. – DOI: 10.1007/s13369-019-03738-5.

20. Comprehensive experimental analysis and sustainability assessment of machining Nimonic 90 using ultrasonic-assisted turning facility / J. Airao, N. Khanna, A. Roy, H. Hegab // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 109. – P. 1447–1462. – DOI: 10.1007/s00170-020-05686-z.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Ultrasonic vibration-assisted hard turning of AISI 52100 steel: comparative evaluation and modeling using dimensional analysis



Govind Ghule<sup>1, a, \*</sup>, Sudarshan Sanap<sup>1, b</sup>, Satish Chinchani<sup>2, c</sup>

<sup>1</sup> MIT-School of Engineering, MIT-ADT University, Pune - 412201, India

<sup>2</sup> Vishwakarma Institute of Information Technology, Pune - 411048, India

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-4331-3501>,  [govindghulemasterofengineering@gmail.com](mailto:govindghulemasterofengineering@gmail.com);

<sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-3788-0692>,  [sudarshan.sanap@mituniversity.edu.in](mailto:sudarshan.sanap@mituniversity.edu.in);

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>,  [satish.chinchani@viit.ac.in](mailto:satish.chinchani@viit.ac.in)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 03 September 2023

Revised: 17 September 2023

Accepted: 27 September 2023

Available online: 15 December 2023

#### Keywords:

Ultrasonic vibrations

Hard turning

Dimensional analysis

Buckingham Pi theorem

Tool wear

Power consumption

### ABSTRACT

**Introduction.** Precision machining of hard and brittle materials is difficult, which has led to the development of novel and sustainable techniques such as ultrasonic vibration-assisted turning (UVAT) for enhanced removal rates, surface quality, and tool life. **The purpose of the work.** Hard turning using cost-effective coated carbide tools instead of costly to operate ceramic and CBN inserts is still not widely accepted due to tool wear and machining limitations. A group of researchers attempted hard turning using carbide tools with different coatings, different cooling techniques, etc., to achieve better machinability. However, very few attempts were made by the researchers on ultrasonic vibration-assisted hard turning (UVAHT). Moreover, comparative evaluation of UVAHT using dimensional analysis is rarely reported in the open literature. **The methods of investigation.** With this view, this study comparatively evaluates the tool wear and power consumption during conventional turning (CT) and ultrasonic vibration-assisted hard turning (UVAHT) of AISI 52100 steel (62 HRC) using a PVD-coated TiAlSiN carbide tool. Experiments were performed with varying cutting speed, feed, and depth of cut while keeping vibration frequency and amplitude constant at 20 kHz and 20  $\mu$ m, respectively. Further, a theoretical model was developed to predict the tool wear and power consumption using the concept of *Dimensional analysis*, i.e., the *Buckingham Pi theorem* considering the effect of cutting speed, frequency, and amplitude of vibrations at constant feed and depth of cut of 0.085 mm/rev and 0.4 mm, respectively. Dimensionless groups were created to reveal complex linkages and optimize machining conditions. Tool wear and power consumption were measured experimentally and statistically analyzed using the *Buckingham Pi theorem*. **Results and Discussion.** Using dimensional analysis, the research uncovers substantial insights into the UVAHT process. The results show that ultrasonic vibration parameters have a significant impact on tool wear and power consumption. Dimensionless groups provide a methodical foundation for refining machining conditions. The tool wear and the power consumption increase with the cutting speed, depth of cut, and feed. However, this effect is more significant in CT than UVAHT. The power consumption increases with the cutting speed, vibration frequency, and amplitude. However, the increase in the power consumption is more prominent when the cutting speed changes, followed by vibration frequency and amplitude. The flank wear increases with the cutting speed and vibration amplitude and decreases with the vibration frequency. This study contributes to a better understanding of the underlying dynamics of UVAHT, which will help to improve precision machining procedures for hard materials. The paper explores the practical significance of these discoveries for hard material precision machining.

**For citation:** Ghule G.S., Sanap S., Chinchani S. Ultrasonic vibration-assisted hard turning of AISI 52100 steel: comparative evaluation and modeling using dimensional analysis. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 136–150. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-136-150. (In Russian).

### References

1. Babitsky V.I., Kalashnikov A.N., Meadows A., Wijesundara A.A.H.P. Ultrasonically assisted turning of aviation materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 132, pp. 157–167. DOI: 10.1016/s0924-0136(02)00844-0.

#### \* Corresponding author

Ghule Govind S., M.E. (Design Engineering), Assistant Professor

MIT-School of Engineering, MIT-ADT University,

Pune - 412201, India

Tel.: +91-7020742258, E-mail: [govindghulemasterofengineering@gmail.com](mailto:govindghulemasterofengineering@gmail.com)

2. Babitsky V.I., Mitrofanov A.V., Silberschmidt V.V. Ultrasonically assisted turning of aviation materials: simulations and experimental study. *Ultrasonics*, 2004, vol. 42, pp. 81–86. DOI: 10.1016/j.ultras.2004.02.001.
3. Vivekananda K., Arka G.N., Sahoo S.K. Design and analysis of ultrasonic vibratory tool (UVT) using FEM, and experimental study on ultrasonic vibration-assisted turning (UAT). *Procedia Engineering*, 2014, vol. 97, pp. 1178–1186. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.396.
4. Liu Y., Li J., Zhang L. Effects of ultrasonic vibration on cutting forces and machined surface quality in turning of AISI 1045 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 101, pp. 1137–1147. DOI: 10.1038/s41598-022-21236-x.
5. Muhammad R., Maurotto A., Roy A., Silberschmidt V.V. Analysis of forces in vibro-impact and hot vibro-impact turning of advanced alloys. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, vol. 70, pp. 315–320. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.70.315.
6. Lotfi M., Amini S., Akbari J. Surface integrity and microstructure changes in 3D elliptical ultrasonic assisted turning of Ti–6Al–4V: FEM and experimental examination. *Tribology International*, 2020, vol. 151, p. 106492. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106492.
7. Celaya A., Luis N.N.L., Francisco J.C., Lamikiz A. Ultrasonic Assisted Turning of mild steels. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2010, vol. 37. DOI: 10.1504/IJMPT.2010.029459.
8. Jiao F., Liu X., Zhao C., Zhang X. Experimental study on the surface micro-geometrical characteristics of quenched steel in Ultrasonic Assisted Turning. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 189–193, pp. 4059–4063. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.4059.
9. Maurotto A., Muhammad R., Roy A., Babitsky V.I., Silberschmidt V.V. Comparing machinability of Ti-15-3-3 and Ni-625 alloys in UAT. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 330–335. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.059.
10. Zou P., Xu Y., He Y., Chen M., Wu H. Experimental investigation of ultrasonic vibration assisted turning of 304 austenitic stainless steel. *Shock and Vibration*, 2015, art. 817598. DOI: 10.1155/2015/817598.
11. Kumar J., Khamba J.S. Modelling the material removal rate in ultrasonic machining of titanium using dimensional analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, vol. 48, pp. 103–119. DOI: 10.1007/s00170-009-2287-1.
12. Kugaevskii S.S., Ashikhmin V.N. Using local coordinate systems for dimensional analysis in the machining. *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ISIE 2018*. Springer, 2018, pp. 301–309. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5\_33.
13. Skelton R.C. Turning with an oscillating tool. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1968, vol. 8, pp. 239–259. DOI: 10.1016/0020-7357(68)90014-0.
14. Mitrofanov A.V., Babitsky V.I., Silberschmidt V.V. Thermomechanical finite element simulations of ultrasonically assisted turning. *Computational Materials Science*, 2005, vol. 32, pp. 463–471. DOI: 10.1016/j.commatsci.2004.09.019.
15. Ghule G.S., Sanap S. Ultrasonic vibrations assisted turning (UAT): A review. *Advances in Engineering Design: Select proceedings of FLAME 2020*. Springer, 2021, pp. 275–285. DOI: 10.1007/978-981-33-4684-0\_28.
16. Nath C., Rahman M., Andrew S.S.K. A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, pp. 159–165. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.047.
17. Ghule G.S., Sanap S., Adsul S., Chinchankar S., Gadge M. Experimental investigations on the ultrasonic vibration-assisted hard turning of AISI 52100 steel using coated carbide tool. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 68 (6), pp. 2093–2098. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.368.
18. Zhang G., Sun Y., Xu L., Wang L., Zuo D. Prediction of erosion volume of PDMS by cryogenic micro-abrasive jet machining based on dimensional analysis method and experimental verification. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 114, pp. 2447–2455. DOI: 10.1007/s00170-021-07020-7.
19. Singh N.K., Sign Y. Experimental investigation and modelling of surface finish in argon-assisted electrical discharge machining using dimensional analysis. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, vol. 44, pp. 5839–5850. DOI: 10.1007/s13369-019-03738-5.
20. Airao J., Khanna N., Roy A., Hegab H. Comprehensive experimental analysis and sustainability assessment of machining Nimonic 90 using ultrasonic-assisted turning facility. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 109, pp. 1447–1462. DOI: 10.1007/s00170-020-05686-z.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.